

## 激光与光电子学进展

## 基于傅里叶级数拟合的光强近场检测方法

侯启真, 王浩\*, 段惠英

中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300

**摘要** 因机场目视助航灯具出射光强度高、出光口尺寸较大,常采用多个发光二极管(LED)排列成阵列的光源形式,这类助航灯光学故障在线检测难度高,目前尚无较便捷的有效检测方法。本文提出一种基于傅里叶级数拟合的照度逼近算法,在适宜的检测距离内获取灯光照度分布,并采用迭代计算的方式获得逼近真实值的单体LED光源光强分布;针对传统傅里叶级数拟合峰值区域误差较高的问题,引入单点方差阈值指标,较好地抑制了拟合峰值区域误差,使单体LED光源匹配度提升了1%;对5种典型阵列的不同故障进行了仿真验证,结果显示,该方法具有较高的通用性,常见故障中匹配度均在94%以上。

**关键词** 光学检测; 阵列型照明器; 傅里叶级数拟合; 助航灯

**中图分类号** TB96 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/LOP222535

## Near-Field Detection Method for Light Intensity Based on Fourier Series Fitting

Hou Qizhen, Wang Hao\*, Duan Huiying

*College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China*

**Abstract** Multiple light-emitting diode (LED) arrays are often used as light sources because of the high lamp-emitting port intensity and large light outlet size of navigation lights in airports. Online fault detection of such navigational lights is challenging, and no convenient and effective detection method has been developed. In this study, an illumination approximation algorithm based on Fourier series fitting is proposed. The illumination distribution of a single LED light source is obtained within a suitable detection distance, and the intensity distribution approximating to real value of the single LED light source is obtained via iterative calculations. Aiming at the problem of high peak-region error of traditional Fourier series fitting, a single-point variance threshold index is introduced to suppress the peak-region error of fitting and improve the matched degree of the single LED light source by 1%. The simulation results of the five typical array faults show that the proposed method exhibits high versatility, and the matched degree of common faults exceeds 94%.

**Key words** optical inspection; array luminaire; Fourier series fitting; navigation lights

## 1 引言

发光二极管(LED)作为一种新型高效节能光源,正广泛应用于生产、生活等各个领域<sup>[1-3]</sup>。助航灯是保障飞行安全的重要设施,为满足助航灯发光构型及光强要求,常将多个LED灯珠同向排列成单体LED光源,多个LED光源按照规定构型安装成助航灯,可在故障后拆卸光源进行更换。助航灯具的检测,有离线检测和在线检测两种方式<sup>[4]</sup>,离线检测方法较多,但时间周期长,随着航班量和航班密度的增加,在线检测需

求越来越高;在线检测主要采用光强检测车实现,因涉及车辆行驶速度、方向的稳定性等因素,检测精度不易控制,该方式适用于全场灯光达标检测。而由于跑道振动、光源老化时间不均匀等原因,阵列型助航灯中单体LED光源发生故障时,灯具光强分布将发生改变,造成飞行员误判。国内外没有关于单体LED光源现场检测的方法,目前的做法是目测判定灯光故障<sup>[5]</sup>,将其更换,送往实验室进行检测,这种方法依赖于人工,准确性差,会造成大量资源浪费,降低机场运行效率,增加成本。

收稿日期: 2022-09-03; 修回日期: 2022-09-17; 录用日期: 2022-09-23; 网络首发日期: 2022-10-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFF0603902)

通信作者: \*2939492009@qq.com

为此,本文提出了一种阵列型助航灯在线检测方法,该方法采用 CCD 图像传感器<sup>[6]</sup>测得灯具照度,利用改进的傅里叶级数拟合方法对单体 LED 光源照度分布进行迭代逼近,最后转换为光强分布,提升了助航灯在线检测精度。本文使用 5 种典型阵列型助航灯的无故障情况与 4 种故障情况验证了提出方法的准确性与通用性。

## 2 基于傅里叶级数迭代拟合的光强检测

### 2.1 阵列型助航灯检测方案

对于多个 LED 组成的阵列,当检测距离与出光口对角线长度足够大时,可视单体 LED 光源为点光源,空间上某点  $(x, y, z)$  接收到的照度值  $E(x, y, z)$  可以表示为每个 LED 光源照度的线性叠加<sup>[7]</sup>,如下式所示:

$$E(x, y, z) = \sum_p \frac{I_p(\omega_p, \nu_p)}{r_p^2} \cos \theta_p, \quad (1)$$

式中:  $I_p$  为第  $p$  个灯的光强分布;  $\omega_p, \nu_p$  分别为第  $p$  个光源到测量点的向量在垂直和水平方向上的夹角;  $\theta$  为光源与测量点法线方向上的夹角;  $r_p$  为测量点与光源的垂直距离。当式(1)中光强分布、LED 光源及测量点的空间位置已知时,  $E(x, y, z)$  唯一;反之,已知  $E(x, y, z)$  数值,求解光强分布时,在不确定单体 LED 光强分布形式与光源数量的情况下,式(1)未知数的总数大于方程组数,因此无法通过  $E(x, y, z)$  求得唯一的 LED 光强分布。

故本文提出了一种通过傅里叶级数迭代计算来逼近单体 LED 光源光强分布的方法。首先使用 CCD 图像传感器获得容许检测距离下助航灯的照度图像,使用图像处理方法获取图像中单体 LED 光源的信息来设定傅里叶级数,并采用傅里叶级数拟合与照度误差迭代计算,获得符合精度约束的单体 LED 光源照度分布,最后将照度分布通过距离平方反比定律转化为光强分布以便进行检测结果分析。具体流程如图 1 所示。

### 2.2 单体 LED 照度分布的拟合方式比较

设单体标准 LED 光源在距离为  $r$  的检测平面上的照度分布为

$$E = \frac{I_0}{r^2} * \cos^m \alpha * \cos^m \beta, \quad (2)$$

式中:  $E$  为标准 LED 光源照度分布;  $I_0$  为中心光强;  $\alpha, \beta$  分别为该 LED 在指定方向上与光轴之间的水平、垂直

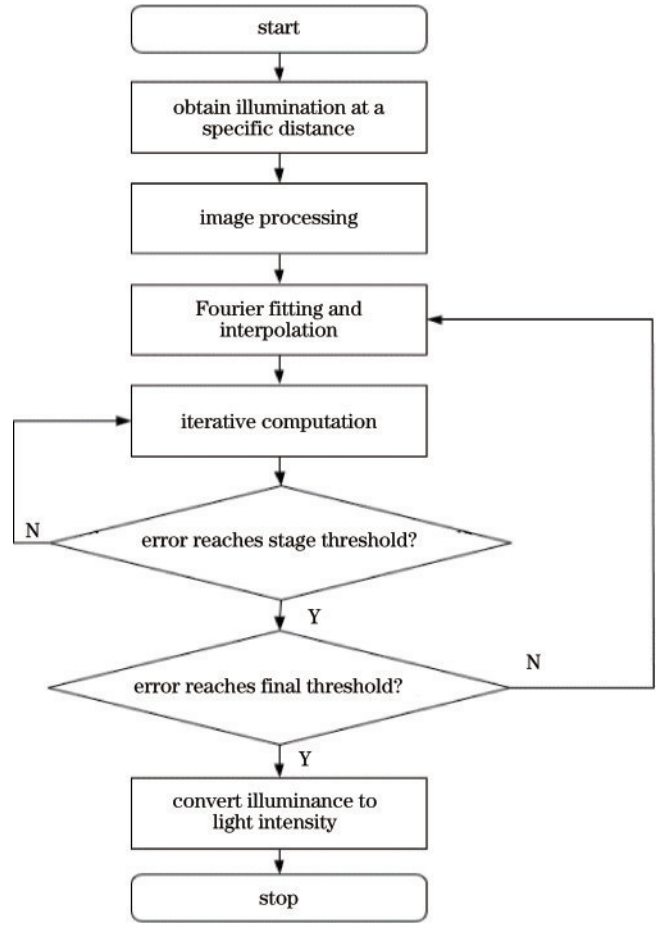


图 1 光强检测流程

Fig. 1 Process of light intensity detection

夹角;  $r$  为 LED 光源到检测点的距离;  $m$  是一个与半发光强角相关的值,其计算公式为

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \theta_{1/2})}, \quad (3)$$

式中,  $\theta_{1/2}$  为光强值等于中心光强  $I_0$  强度一半时的夹角。取单体标准 LED 光源照度分布的水平角度曲线作为真实曲线,并随机选取数个采样点,分别采用分段三次 Hermit 插值(Pchip)、线性插值(Linear)、样条插值(Spline)、多项式拟合(Polynomial)与傅里叶级数拟合(Fourier)进行拟合,结果如图 2 所示。

图 2 显示,傅里叶级数拟合效果最好,使用均方根误差 ( $R_{MSE}$ ) 对上述逼近效果进行量化评价,结果如表 1 所示。

由表 1 可见,相较于其他拟合方法,傅里叶级数拟合对于类三角函数型与类高斯函数型光强分布的预测性更佳。

### 2.3 傅里叶级数拟合算法改进

傅里叶级数拟合的精度,是限制检测结果的一个

表 1 不同拟合方法的误差

Table 1 Errors of different fitting methods

Evaluation criterion	Pchip	Linear	Spline	Polynomial	Fourier
$R_{MSE}$	15.4788	40.7641	15.9086	43.4398	3.8321

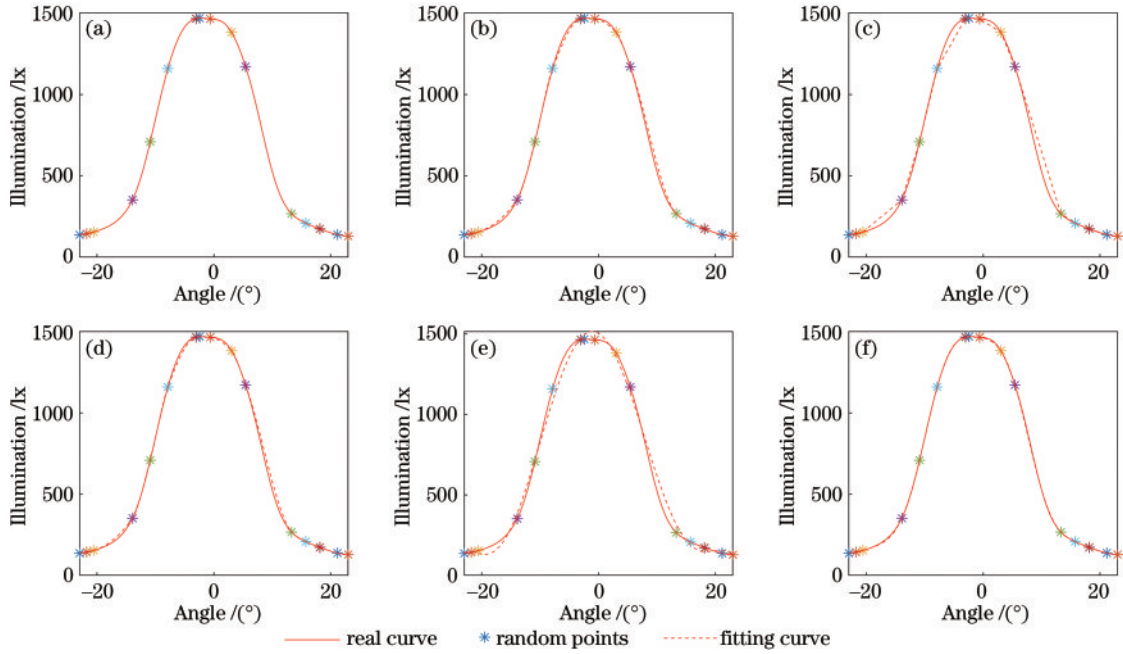


图 2 插值方法比较。(a)真实曲线和随机采样点;(b)分段三次 Hermit 插值;(c)线性插值;(d)样条插值;(e)多项式拟合;(f)傅里叶级数拟合

Fig. 2 Comparison of interpolation methods. (a) Real curve and random points; (b) Pchip; (c) Linear; (d) Spline; (e) Polynomial; (f) Fourier

重要因素。传统傅里叶级数拟合时,评判指标采用的是全局误差<sup>[8-10]</sup>,这使得函数峰值区域拟合难以达到最佳效果。LED 峰值是判断其故障状态的关键参数,相对于全局拟合精度,照度检测更看重函数峰值区域的拟合精度。若在大角度照度范围内均布采样,传统傅里叶级数拟合会出现难以准确描述峰值区域函数变化的情况,如图 3(a)所示,此时  $R_{MSE} = 25.2317$ ,拟合曲线在函数峰值区域的拟合效果不佳,因此,在傅里叶级数拟合算法中引入单点方差阈值方法以减小峰值误差<sup>[11-12]</sup>,具体计算流程如下。

1) 对原始数据进行傅里叶级数拟合,得到第一次拟合的傅里叶级数为

$$f(x) = A_{10} + \sum_n [A_{1n} \cos(xn\omega_1) + B_{1n} \sin(xn\omega_1)], \quad (4)$$

式中: $x$ 为拟合范围; $A$ 、 $B$ 均为拟合常数项; $n$ 为傅里叶

级数的阶数,取值范围为非负整数。

2) 计算拟合函数与真实数据每个点的方差  $\mu_{err}(x_i)$ ,即

$$\mu_{err}(x_i) = [Y_i - f(x_i)]^2. \quad (5)$$

结果如图 3(b)所示,与分析一致,误差集中在函数的峰值区域。设每两个极小值之间的定义域为一个波段  $D(x_i)$ 。

3) 设定阈值  $\mu_{err}$ ,若单点方差  $\mu_{err}(x_i)$ 满足条件:

$$\mu_{err}(x_i) > \mu_{err}, \quad (6)$$

则将满足条件的波段  $[D(x_i)_{min}, D(x_i)_{max}]$ 进行二次傅里叶级数拟合。

4) 在曲线交界处删除下方曲线大于上方曲线的奇异点并使用插值平滑曲线。最后得到的曲线形式如图 3(c)所示,得到的方程形式为

$$\begin{cases} f(x) = A_{10} + \sum_n [A_{1n} \cos(xn\omega_1) + B_{1n} \sin(xn\omega_1)], & x \in [0, t_1) \\ f(x) = g_1(x), & x \in [t_1, t_2) \\ f(x) = A_{20} + \sum_n [A_{2n} \cos(xn\omega_2) + B_{2n} \sin(xn\omega_2)], & x \in [t_2, t_3), \\ f(x) = g_2(x), & x \in [t_3, t_4) \\ f(x) = A_{10} + \sum_n [A_{1n} \cos(xn\omega_1) + B_{1n} \sin(xn\omega_1)], & x \in [t_4, x) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$ 分别为两条傅里叶级数去掉奇异点之后的端点横坐标; $g(x)$ 为插值项。

最终得到的曲线如图 3(d)所示,相对于原始拟合

算法[图 3(a)],这种改进的算法可以较好地抑制峰值误差,克服了原始算法在拟合范围较大时难以精确描述峰值区域的缺点,改进傅里叶级数拟合方法的

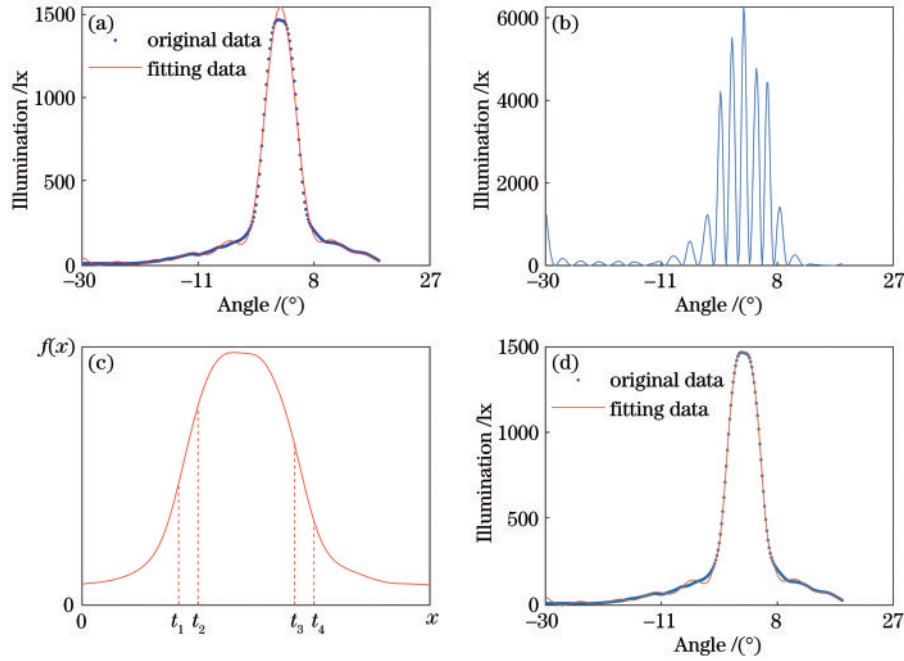


图 3 傅里叶级数拟合算法改进。(a)传统拟合算法;(b)单点方差;(c)曲线形式;(d)改进的拟合算法

Fig. 3 Improvement of Fourier series fitting algorithm. (a) Traditional fitting algorithm; (b) variance of each point; (c) curve form; (d) improved Fourier series fitting algorithm

$R_{MSE} = 11.4865$ , 相较于改进前的  $R_{MSE} = 25.2317$ , 拟合精度提高了 54%, 故本文将使用改进后的傅里叶级数拟合算法。

### 2.4 容许检测距离

容许检测距离是指本检测方案中, 获取照度数据时 CCD 图像传感器应处的距离范围, 为保证近场测量, 同时检测误差足够小, 传感器应处在小于整个灯具的近场条件、大于单体 LED 光源的远场条件内, 同时也为获得更多关于单体 LED 光源的信息, 需对检测距离的上下限做出要求。

根据《灯具分布光度测量的一般要求》(GB/T 9468-2008)<sup>[13]</sup>, 采用光强匹配度  $F_{lum, fit}$ <sup>[14]</sup> 作为检测精度指标:

$$F_{lum, fit} = 100\% * \left( 1 - \frac{\sqrt{\sum_0^{360} \sum_0^{180} [I_1(\alpha, \beta) - I_2(\alpha, \beta)]^2}}{\sqrt{\sum_0^{360} \sum_0^{180} [I_1(\alpha, \beta) + I_2(\alpha, \beta)]^2}} \right), \quad (8)$$

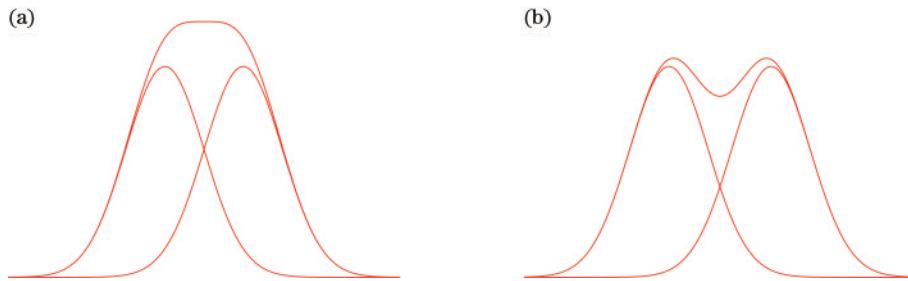


图 4 不同检测距离下的图像。(a)  $>r$ ; (b)  $<r$

Fig. 4 Images at different detection distances. (a)  $>r$ ; (b)  $<r$

式中:  $I_1, I_2$  为两个 LED 的光强;  $\alpha, \beta$  为测量点与中心光轴的角度。根据《发光强度计量器具》(JJG 2034-2005)<sup>[15]</sup>, 发光强度测量仪器允许误差为  $\pm 10\%$ 。对于多个圆形 LED 组成的阵列, 单体 LED 光源出光口对角线尺寸与检测距离之比大于 0.1 时为远场, 距离平方反比定律误差为 1%<sup>[16]</sup>, 因此, 为减少误差并保证检测距离裕量, 本文将该距离设定为最小检测距离, 同时对最大检测距离也进行了约束。

当阵列中的单体 LED 光源被认定为点光源时, 设两 LED 光源间的距离为  $\Gamma$ , 根据斯派洛法则<sup>[17]</sup>, 可以得到最大平坦条件  $\Gamma_{max}$  下的检测距离  $r$  为

$$r = \frac{\Gamma_{max} \sqrt{m+3}}{2}. \quad (9)$$

在检测距离大于或小于  $r$  时, 得到的光源图像如图 4 所示。

与图 4(a) 相比, 图 4(b) 中两 LED 光源交叠照度的非均匀性能够更清晰地描述单体 LED 光源特征, 可以通过图像处理获取这些信息来进行后续处理, 且该距

离一般小于整个灯具的远场距离,因此测量装置的最大检测距离为最大平坦条件限制的检测距离  $r$ 。

### 2.5 基于点距误差的照度逼近

将 CCD 图像传感器设定在容许检测距离内,并根据图像信息设定傅里叶级数。为了得到单体 LED 光源光强分布,需要进行迭代照度逼近。根据式(1),测量平面上每个点的照度值为一个或多个 LED 光源照度的叠加,LED 光源距离测量点越近则数值占比越大,这种位置关系可以映射到照度图上单体 LED 光源中心照度点与测量点的位置关系。因此照度逼近公式为

$$\begin{cases} \Delta = E(x, y, z) - e_{x,y,p}^{(s)} \\ e_{x,y,p}^{(s+1)} = e_{x,y,p}^{(s)} - \Delta / \|d_p(x, y)\|_2 \\ \|d_p(x, y)\|_2 = \sqrt{(X_p - x)^2 + (Y_p - y)^2} \end{cases}, \quad (10)$$

式中:  $e_{x,y,p}$  为第  $p$  个灯在检测平面  $z$  上  $(x, y)$  点的计算照度;  $E(x, y, z)$  为空间上某点实测的照度;  $(X_p, Y_p)$  为第  $p$  个灯在检测平面  $z$  上的最大值点的坐标;  $s$  表示迭代次数。

## 3 典型阵列型助航灯具检测方案仿真

### 3.1 设定傅里叶级数

当前阵列型助航灯的典型构型主要有矩形阵列、圆形阵列、线形阵列、翼形阵列、X形阵列,涵盖跑道入口警戒灯、中线灯、末端灯、进近灯、关闭警示灯,以及舰载助降灯(翼形阵列)、日常道路照明时的路灯等各类常见类型的 LED 阵列,实际场景应用范围较广。在 TRACEPRO 中构建上述典型阵列模型。如图 5 所示。

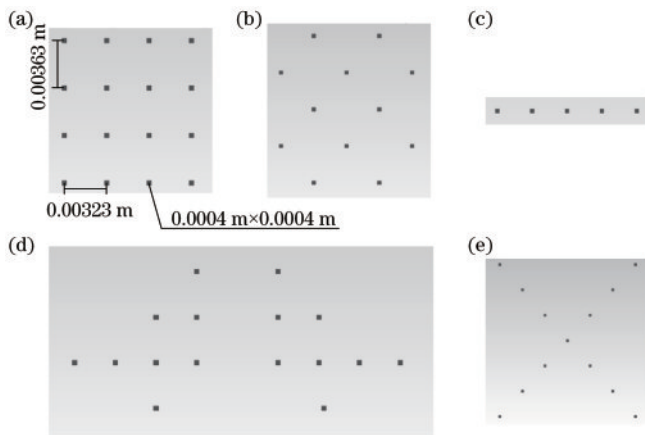


图 5 助航灯的典型构型。(a)矩形阵列;(b)圆形阵列;(c)线形阵列;(d)翼形阵列;(e)X形阵列  
Fig. 5 Typical configurations of navigation lights. (a) Rectangular array; (b) circular array; (c) line-shaped array; (d) wing-shaped array; (e) X-shaped array

1)由 2.4 节分析可知,在阵列型助航灯中相邻两个 LED 光源间隔越小、半光强角越大时,其  $m$  值越小,照

度交叠程度越高,容许检测距离越小。选取最恶劣条件——最小测量距离和较大半发光强角进行仿真。以矩形阵列为例,在其 LED 外壳间隔为 0.001 m 时,其出光口间隔如图 5(a)所示。设置半光强角为  $23^\circ$ ,  $m = 8.4$ ,即容许检测距离为(0.0057, 0.0082) m,设置检测平面于距 LED 平面  $z$  轴正方向 0.0075 m 处,得到  $256 \times 256$  照度数据矩阵,使用 Matlab 显示为灰度图,并通过基于全局阈值的图像分割方法将获得的图像转换为对应的边缘向量,再根据边缘向量的叉乘来判断图像的凹凸性。而边缘上凸点的连接交叉点,即为中心照度所在的大致方位。由于检测距离打破了最大平坦条件,各 LED 之间照度的相交边界处会产生局部极小值点,利用质心法获取极小值点。结果如图 6 所示。

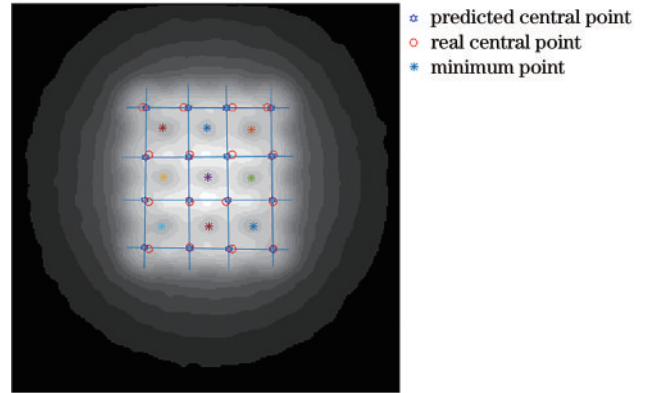


图 6 图像处理结果  
Fig. 6 Result of image processing

2)构建傅里叶级数拟合空间。取中心照度点坐标为傅里叶级数最大值坐标,值取  $E_0/2$ 、 $E_0$  为每个 LED 光源中心照度点所在坐标照度。将极小值点取做相邻傅里叶级数在拟合空间  $z$  平面上的交点,值取  $E_{in}/4$ 、 $E_{in}$  为交点坐标照度值。因在灯具四角的 LED 光源  $45^\circ$  方向上受其余 LED 光源照度影响最小,取  $45^\circ$  方向上照度值为阵列照度 10% 的点距离该光源最大值点的长度的两倍作为傅里叶级数的长度,并设其值为  $E_0/20$ 。此时共获得包括上述点的对称点所在的 5 个点。使用 Matlab 的傅里叶 6 阶级数拟合至少需要 14 个点,将上述点进行插值,并进行第一次傅里叶级数拟合。在每个中心照度点的  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  四个方向分别进行一次上述过程,并使用插值填充剩余空白数据,将得到的每个单体 LED 光源拟合结果映射到光强分布后如图 7 所示。其中,图 7(a)为真实光强分布,图 7(b)为拟合光强分布,将两光强分布代入式(8),可得第一次的匹配度仅有 66.9800%。

3)将数据代入照度逼近公式(10),设定每段误差阈值为 10%,根据点距误差照度逼近算法进行迭代计算,为保证检测精度,在照度误差达到设定的阶段阈值时停止迭代,并随机取出两次包括最大值点在内间隔

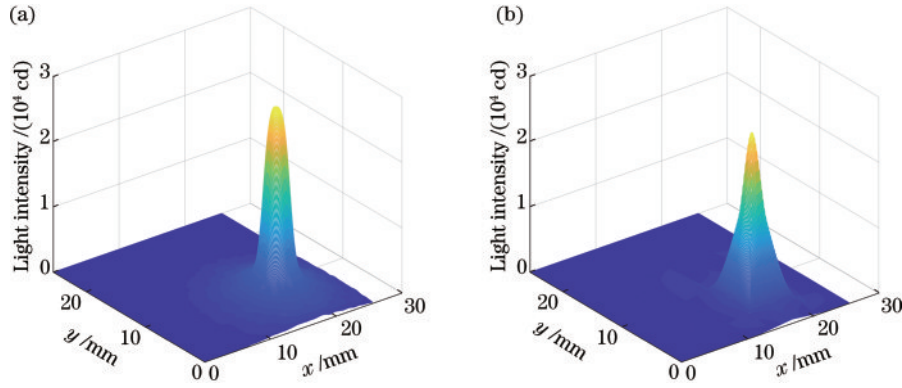


图 7 单体 LED 光源光强分布。(a) 真实光强分布；(b) 第一次拟合的光强分布

Fig. 7 Light intensity distributions of single LED light source. (a) True light intensity distribution; (b) light intensity distribution of first fitting

服从高斯分布的点,使用这两次取出的点拟合傅里叶级数并求均值,将算好的函数重新带回并插值以修正数据,在误差达到设定的最终阈值后停止迭代并输出

结果。分别使用原始傅里叶级数拟合方式( $B_f$ )与改进后的傅里叶级数拟合方式( $A_f$ )进行迭代计算,得到的结果如图 8 所示,匹配度数据如表 2 所示。

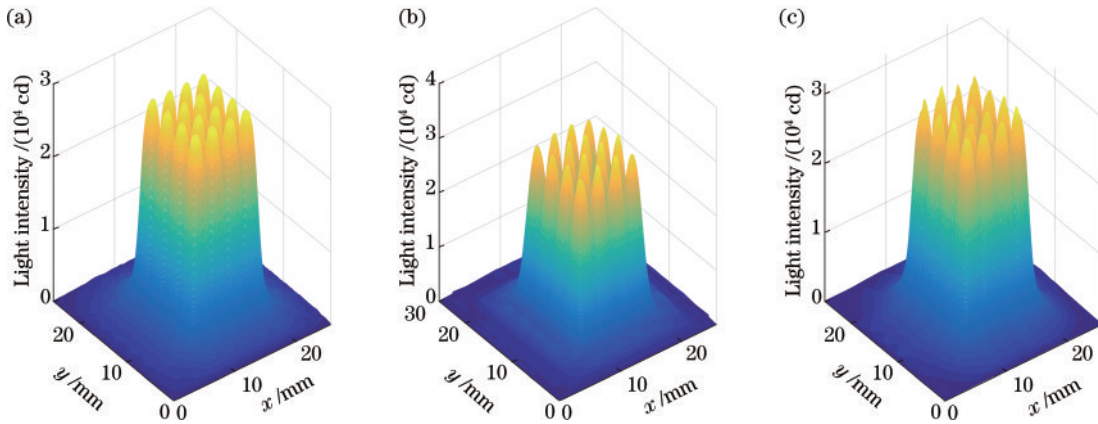


图 8 计算结果比较。(a) 真实光强分布；(b) 原始算法的光强分布；(c) 改进算法的光强分布

Fig. 8 Comparison of calculation results. (a) True light intensity distribution; (b) light intensity distribution of primal algorithm; (c) light intensity distribution of improved algorithm

表 2 两种算法计算的匹配度

Table 2 Matched-degrees calculated by two algorithms

Method	Name	Matched-degree / %	Name	Matched-degree / %	Name	Matched-degree / %
$B_f$	LED1	95.3634	LED2	95.5262	LED3	95.2363
$B_f$	LED4	95.1808	LED5	95.2065	LED6	95.3287
$B_f$	LED7	95.5226	LED8	95.5019	LED9	95.6118
$B_f$	LED10	94.8458	LED11	94.9159	LED12	95.8700
$B_f$	LED13	94.7419	LED14	95.4204	LED15	95.2305
$B_f$	LED16	95.3509	—	—	—	—
$A_f$	LED1	95.6917	LED2	96.2803	LED3	95.7017
$A_f$	LED4	95.8231	LED5	96.3546	LED6	96.3257
$A_f$	LED7	96.2638	LED8	96.5252	LED9	96.4384
$A_f$	LED10	95.9027	LED11	96.2491	LED12	96.3910
$A_f$	LED13	96.0759	LED14	95.8049	LED15	95.6712
$A_f$	LED16	95.9833	—	—	—	—

表 2 中显示,本文提出的方法对于单体 LED 光源光强分布的预测性较好。同时,原始算法由于对函

数峰值区域拟合效果欠佳,导致迭代过程中的精度损失较高,使得算法匹配度为 94%,而改进的算法

提升了峰值区域的拟合精度,使得匹配度提升至 95%。

### 3.2 故障检测

《国际民用航空公约》附件 14(ICAO ANNEX14)<sup>[18]</sup> 规定了各类灯具的光强分布,并要求主光束方向偏差不得大于 0.5°。构成灯具的各单体 LED 光源光强不

足( $W_{ea}$ )、过强( $B_{ri}$ )、光轴偏移(偏移 10°: $I_{n10}$ 和偏移 30°: $I_{n30}$ )以及不亮( $D_{es}$ )这 4 种故障,可能会使主光轴产生偏移或使实际光强分布图像产生变化。设置无故障情况( $N_{or}$ )与 4 种故障情况,使用 5 种阵列进行仿真。结果如图 9 所示。

得到的匹配度数据如表 3 所示。

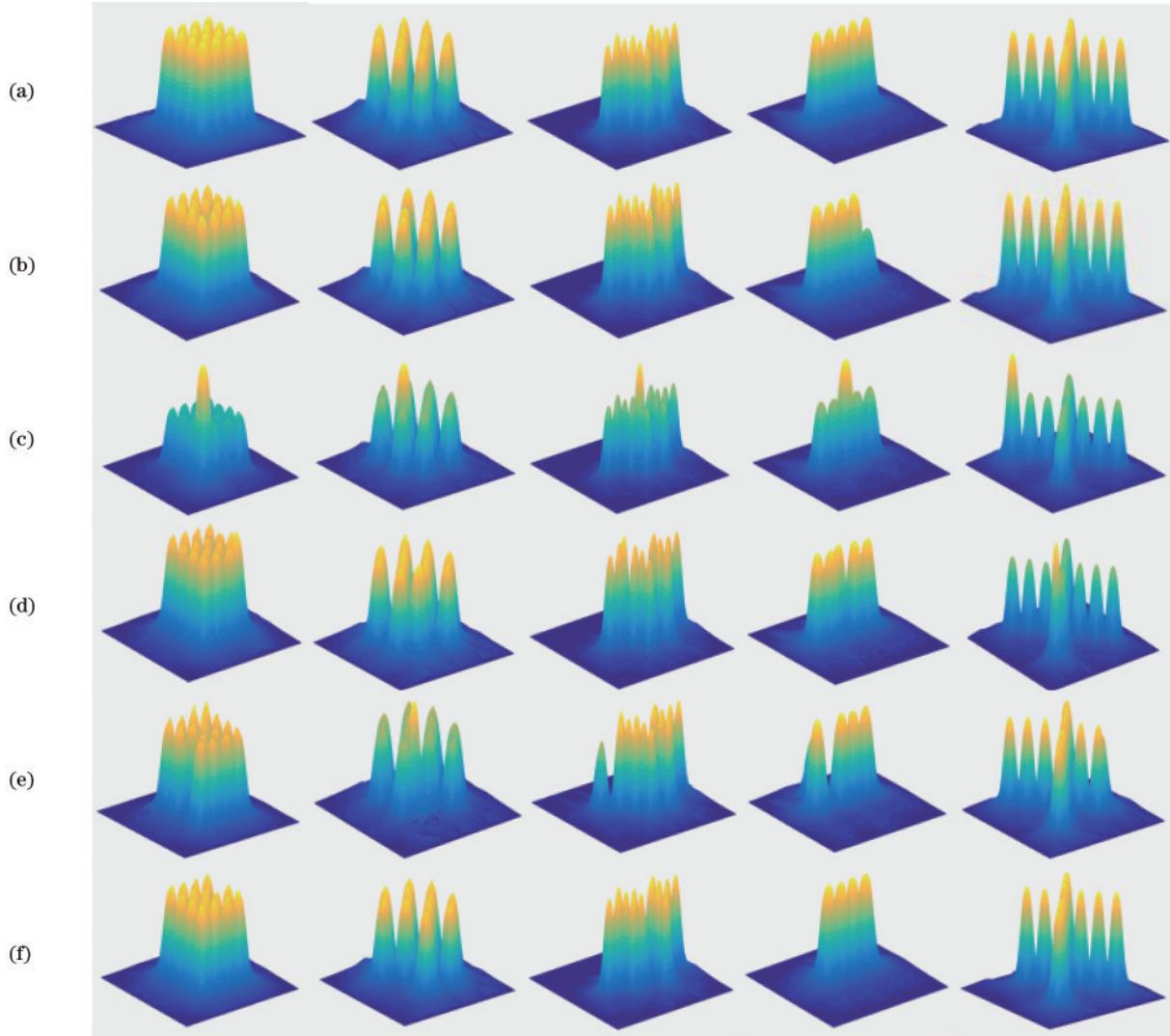


图 9 5 种阵列的检测结果。(a)真实光强分布;(b) $W_{ea}$ ;(c) $B_{ri}$ ;(d) $I_{n10}$ ;(e) $I_{n30}$ ;(f) $D_{es}$

Fig. 9 Detection results of five arrays. (a) True light intensity distribution; (b)  $W_{ea}$ ; (c)  $B_{ri}$ ; (d)  $I_{n10}$ ; (e)  $I_{n30}$ ; (f)  $D_{es}$

表 3 5 种阵列的匹配度

Table 3 Matched-degrees of five arrays

State	Matched-degree	Rectangular array /%	Circular array /%	Line-shaped array /%	Wing-shaped array /%	X-shaped array /%
$N_{or}$	Maximum	96.5252	96.2789	96.1328	96.7050	96.0229
$N_{or}$	Minimum	95.6711	94.8007	95.5327	95.0409	95.1517
$W_{ea}$	Fault light	95.6939	95.7793	95.0564	95.3946	94.8819
$W_{ea}$	Maximum	96.5022	96.3018	96.2403	96.7582	96.5447
$W_{ea}$	Minimum	95.6802	94.7949	95.0564	95.0640	94.2362
$B_{ri}$	Fault light	95.6524	95.7465	95.7465	95.7538	94.6311
$B_{ri}$	Maximum	96.4493	96.0177	96.0178	96.7538	96.4775
$B_{ri}$	Minimum	95.6499	95.1925	95.1925	95.0324	94.8414
$I_{n10}$	Fault light	94.8098	92.3575	93.3296	94.5359	92.5587

续表

State	Matched-degree	Rectangular array /%	Circular array /%	Line-shaped array /%	Wing-shaped array /%	X-shaped array /%
$I_{n10}$	Maximum	96.6487	95.7747	95.8416	96.6247	96.4892
$I_{n10}$	Minimum	94.8098	92.3575	93.3296	94.5359	92.5587
$I_{n30}$	Fault light	90.9318	90.3635	90.0581	90.0404	90.5622
$I_{n30}$	Maximum	95.6053	95.6890	95.7566	97.1462	95.8768
$I_{n30}$	Minimum	90.9318	90.3635	90.0581	90.0404	90.5622

LED光源不亮故障中所有故障灯匹配度均为0,这是由于在匹配度公式(8)中, $I_1$ 为0的情况下,无论 $I_2$ 数值是多少结果都为0,那么式(8)不再适用,故使用均方根误差 $R_{MSE}$ 来计算误差,使用故障灯计算照度最

大值(MAXF)、故障灯计算照度平均值(AVGF)、正常灯计算照度最大值(MAXN)、正常灯计算照度平均值(AVGN)4种计算值来衡量数据,结果如表4所示。

表4 光源不亮匹配度  
Table 4 Matched-degrees of  $D_{es}$

State	Evaluation criterion	Rectangular array	Circular array	Line-shaped array	Wing-shaped array	X-shaped array
$D_{es}$	$R_{MSE}$	1988.0009	2289.3994	2289.3994	596.3085	3904.1982
$D_{es}$	MAXF /lx	643.5443	1195.7284	1374.3856	398.6711	406.0723
$D_{es}$	AVGF /lx	92.9603	65.3995	66.6207	16.1390	19.6735
$D_{es}$	MAXN /lx	29366.4644	29324.8000	29222.8000	29718.7000	29680.2000
$D_{es}$	AVGN /lx	1001.9878	1103.3010	1109.4476	493.6655	653.3582

从表3~4中可见,该方法对于助航灯中各类位移性故障检测均有较好的表现,且更擅长处理LED光源过暗、过亮以及不亮这类常见故障,匹配度在94%以上。在实际情况中,偏移 $30^\circ$ 为极限情况,肉眼即可分辨且发生概率极低,在处理这类极限故障时的匹配度不如其他故障类型匹配度高,但仍在可接受的范围(90%)内。在LED光源不亮情况中,所有的计算值均远小于正常LED光源,可认定为LED光源不亮。

## 4 结 论

针对当前没有阵列型助航灯单光源在线检测的现状,提出了一种近场条件下的LED阵列型助航灯单光源在线检测方法,并改进了傅里叶级数拟合算法,解决了传统算法无法精确描述峰值区域的问题,将单体LED匹配度提升约1%。使用5种典型阵列的4种故障进行了仿真验证,结果表明,该方法在常见故障检测中匹配度均能达到94%以上,在极限故障情况中能达到90%,满足国家标准中对光强检测装置的要求,且具有较高通用性。该方法对于阵列型助航灯特别是大尺寸阵列型助航灯或其他需要进行单光源检测的阵列型灯具有较大的意义,为当前没有阵列型助航灯单灯在线检测方法的现状提供了一种新的思路,也可应用于LED灯珠出厂检测、舰载光学助降系统检测等。在实际应用时,只需根据LED光源参数确定检测距离即可完成检测,大大缩减了灯具维护成本,缩短了检测周期,提高了资源利用率。

## 参 考 文 献

- [1] Pimputkar S, Speck J S, DenBaars S P, et al. Prospects for LED lighting[J]. Nature Photonics, 2009, 3(4): 180-182.
- [2] 赖丽萍, 庄其仁. LED植物灯高均匀性照明鳞甲透镜设计[J]. 中国激光, 2022, 49(18): 1805001.  
Lai L P, Zhuang Q R. Design of high uniformity illumination scale lens for LED plant lamp[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(18): 1805001.
- [3] Chiu H J, Lo Y K, Chen J T, et al. A high-efficiency dimmable LED driver for low-power lighting applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(2): 735-743.
- [4] 侯启真. 机场目视助航灯光在线检测系统关键技术研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2008.  
Hou Q Z. Research on the key technologies of real-time navigation light measuring system[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2008.
- [5] 姜巍. 基于卷积神经网络的机场助航灯故障诊断[J]. 软件导刊, 2018, 17(11): 2, 113-115, 119.  
Jiang W. Fault diagnosis of airfield lighting based on convolutional neural network[J]. Software Guide, 2018, 17(11): 2, 113-115, 119.
- [6] 周龙峰, 张昂, 张俊波, 等. 基于CCD探测器的点目标成像平均半径误差分析及最优阈值选择[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0711006.  
Zhou L F, Zhang A, Zhang J B, et al. Error analysis of spot diagram's Mean radius measured with CCD sensor and choice of the optimal threshold[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0711006.
- [7] 侯启真, 马秉正. 基于误差反馈的LED阵列近场光强检测[J]. 计量学报, 2021, 42(8): 993-999.



- Hou Q Z, Ma B Z. Near-field intensity detection of LED array based on error feedback[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2021, 42(8): 993-999.
- [8] 戴婷. 基于傅里叶拟合的多种季节划分法及相似度量[J]. *湖南工程学院学报(自然科学版)*, 2020, 30(3): 30-36.
- Dai T. Season division and similarity measurement based on Fourier fitting[J]. *Journal of Hunan Institute of Engineering (Natural Science Edition)*, 2020, 30(3): 30-36.
- [9] 屈文星, 刘浩, 秦楚, 等. 基于 MATLAB 傅里叶曲线拟合的天线跟踪精度评估方法[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(12): 91-95.
- Qu W X, Liu H, Qin C, et al. Antenna tracking accuracy evaluation method based on MATLAB Fourier curve fitting[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(12): 91-95.
- [10] 杨可君, 韩陈浩磊, 刘磊, 等. 全局曲线拟合实现高厚度检测分辨力的结构光照明显微术[J]. *光学学报*, 2022, 42(20): 2012001.
- Yang K J, Han C H L, Liu L, et al. Structural illumination microscopy with a high thickness resolution based on global curve fitting[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(20): 2012001.
- [11] 朱保林, 陈明阳, 刘焯轩, 等. 一种基于最小二乘法分段拟合的列车加速度在线估计算法[J]. *机车电传动*, 2022(1): 20-24.
- Zhu B L, Chen M Y, Liu Y X, et al. Real-time train acceleration estimation method based on least-square piecewise linear fitting[J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2022(1): 20-24.
- [12] 王露, 邢宗义, 陈双, 等. 基于自动提取分段点的车轮外形轮廓拟合方法[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2017, 42(2): 618-626.
- Wang L, Xing Z Y, Chen S, et al. A wheel profile fitting method based on automatically extracting subsection points[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2017, 42(2): 618-626.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局. 灯具分布光度测量的一般要求: GB/T 9468—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. General requirements for the photometry and goniophotometry of luminaires: GB/T 9468—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [14] Bergen A S J. A practical method of comparing luminous intensity distributions[J]. *Lighting Research & Technology*, 2012, 44(1): 27-36.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局. 发光强度计量器具: JJG 2034—2005[S]. 北京: 中国计量出版社, 2005.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Measuring instruments for luminous intensity: JJG 2034—2005[S]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2005.
- [16] 郑世鹏, 郭晓亮, 张磊. 测试距离对 LED 灯具光强检测精度的影响[J]. *重庆理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 24(2): 95-98.
- Zheng S P, Guo X L, Zhang L. Effect of test distance on the luminous intensity detection precision of LED lamps [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2010, 24(2): 95-98.
- [17] 冯波. 基于机器视觉的纸病诊断系统架构和光源优化策略研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2021.
- Feng B. Research on system architecture and light source optimization strategy for paper defect diagnosis system based on machine vision[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2021.
- [18] 国际民航组织. 国际民航公约附件—14[Z]. 北京: 中国民用航空总局机场司, 2018. [http://www.icscc.org.cn/upload/file/20200508/20200508103101\\_42514.pdf](http://www.icscc.org.cn/upload/file/20200508/20200508103101_42514.pdf).